تأثیرات پوزولانی متاهالوزیت و میکروسیلیس بر مقاومت مکانیکی و دوام بتن*

ابوالفضل سلطانی[1] امیر طریقت[2] محمد بایزیدی[3]

چکیده *به‌منظور تعیین اثرات پوزولانی متاهالوزیت و میکروسیلیس بر مقاومت و دوام بتن، ۸ طرح اختلاط با دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ و ۰/۴۵ ساخته شد. در این مخلوط‌ها متاهالوزیت به‌میزان ۱۰ و ۲۰ درصد و میکروسیلیس به‌میزان صفر و ۷ درصد جایگزین سیمان پرتلند معمولی شدند. عمل‌آوری نمونه‌ها تا سنین ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. نتایج نشان داد که توأم شدن این دو پوزولان در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی به‌ویژه در نسبت کمتر (۰/۴۰) با مشارکت ۱۰ درصد متاهالوزیت، به‌مقدار قابل‌توجهی (۰/۸۹) باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی گردید (۴۷/۷ MPa) گردید. بیشترین مقاومت خمشی (۶/۱۸ MPa) نیز در کمترین نسبت آب به مواد سیمانی به‌دست آمد. البته با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی مقاومت خمشی همهٔ نمونه‌ها به‌مقدار بسیار ناچیزی کاهش یافت. افزایش سرعت امواج اولتراسونیک نسبت به نمونه‌های شاهد مخصوصا در جایگزینی ۱۰ درصد متاهالوزیت، نشانهٔ برتری عملکرد این پوزولان طبیعی در بهبود مقاومت و دوام بتن است.*

واژه‌های کلیدی بتن، متاهالوزیت میکروسیلیس، مقاومت مکانیکی، دوام.

Pozzolanic Effects of Meta-Halloysite and Micro-Silica on Mechanical Strength and Durability of Concrete

A. Soltani A. Tarighat M. Byezidi

Abstract *To determine the effects of meta-halloysite and micro-silica pozzolans on mechanical strength and durability of concrete, 8 mix designs with two water/cementitious (W/C) ratios of 0.40 and 0.45 were performed. The ordinary Portland cement (OPC) was replaced by incorporations of 10 and 20% of meta-halloysite, and 7% of micro-silica. Samples were cured until the ages of 14, 28 and 90 days. Results imply that the combination of meta-halloysite and micro-silica for both W/C ratios particularly in the case of the lower ratio (0.40) when the sample contains 10% meta-halloysite, leads to a significant increase (89%) in the compressive strength of mixes (from 25.3 to 47.7 MPa). Also, the highest flextural strength (6.18 MPa) resulted in the lower W/C ratio (0.40). It is noteworthy that increases in W/C ratios for all mixes don't lead to remarkable decreases in flextural strengths. Notably, the ultrasonic velocity (UV) for all mixes in the lower W/C ratio (0.40) shows a considerable increase particularly in 10% meta-halloysite compared with control samples. The findings above are all indications of better improvement of concrete strengths by natural pozzolan (meta-halloysite).*

Key Words Concrete, Meta-halloysite, Silica-fume, Mechanical Strength, Durability.

*تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۸/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱/۱۴ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران. Email: asoltani@sru.edu

(۲) دانشیار ، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد عمران– سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

مقدمه

اخیرا تحقیقات زیادی برای کاهش انتشار گاز CO_2 و تأثیرات مضر ناشی از ساخت سیمان، توسط سازمان بین‌المللی انرژی (International Energy Agency) درجهت توسعهٔ پایدار انجام شده‌است و استفاده از مواد مکمل سیمانی مانند پوزولان‌ها درجهت کاهش مصرف کلینکر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. از طرفی محدودیت‌های پوزولان‌های صنعتی، باعث شده‌است که استفاده از پوزولان‌های طبیعی به سرعت مورد مطالعات و امکان‌سنجی قرار گیرد [3-1]. در بسیاری از کشورها، مخصوصا ایران منابع زیادی از خاک‌های رسی دارای تنوع ترکیب شیمیایی به‌عنوان پوزولان‌های طبیعی وجود دارد، اما از جنبهٔ تکنولوژی بتن و کاربرد مهندسی عمران، تاکنون مطالعات قابل‌توجهی برروی آنها انجام نشده‌است.

افزودن درصدی از مواد پوزولانی به بتن سبب بهبود و ارتقای بسیاری از خواص آن می‌شود مانند کارایی، دوام، مقاومت، جلوگیری از ایجاد ترک و کاهش نفوذپذیری. میکروسیلیس به‌عنوان معروف‌ترین پوزولان صنعتی، اساسی‌ترین نقش فیزیکی خود را به‌صورت فیلر (پرکننده) در بتن ایفا می‌کند [3, 4]. به‌دلیل سطح ویژهٔ زیاد و داشتن سیلیس آمورف فراوان، این پوزولان صنعتی فعال، عملکرد شیمیایی خود را با سرعتی بیش از پوزولان‌های طبیعی انجام می‌دهد؛ اما ورود پوزولان طبیعی در بتن (مانند رس کلسینه‌شده) باعث می‌شود که با هیدروکسید کلسیم اضافی ناشی از واکنش‌های هیدراسیون سیمان، واکنش دهد و سیلیکات کلسیم آبدار (C-S-H) و نیز سیلیکات آلومینیم- کلسیم آبدار (C-A-S-H) تولید کند که سبب بهبود کیفیت، پیشرفت مقاومت و مصرف هیدروکسید کلسیم تولیدشده در طی عمر بتن می‌شود [5-3]. به‌همین خاطر در این تحقیق، درصدهایی از پوزولان صنعتی (میکروسیلیس) و پوزولان طبیعی (هالوزیت) به‌عنوان مواد افزودنی به‌منظور جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند، در طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مشارکت کردند تا ضمن جایگزین‌شدن با سیمان، خواص بتن را بهبود و مقاومت و دوام آن را افزایش دهند.

میکروسیلیس یک محصول جانبی کارخانه‌های تولید فروآلیاژهای سیلیکاتی است که در بتن‌های با مقاومت زیاد معمولا جزء جدایی‌ناپذیر است زیرا با خاصیت پراکندگی ذرات سیمان (dispersion)، مصرف آب را کاهش می‌دهد، کارایی بتن را افزایش می‌دهد و مقاومت اولیهٔ آن را بهبود می‌بخشد. به‌دلیل وجود مقادیر زیادی سیلیس آمورف موجود در میکروسیلیس، علاوه‌بر افزایش مقاومت خمیر سیمان، از طریق بهبود کیفیت اتصال بین خمیر و سنگدانه باعث افزایش مقاومت بتن نیز می‌شود.

هالوزیت یک مادهٔ طبیعی معدنی (ثانویه) از کانی‌های آلومینیم سیلیکاتی آبدار گروه کائولن با ورقه‌های تتراهدرال و اکتاهدرال و فرمول شیمیایی آن $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ است که وقتی دارای دو ملکول آب تبلور است، اندلایت (Endellite) نام دارد. اندلایت در دمای ٤٠٠ درجهٔ سانتی‌گراد به هالوزیت تبدیل می‌شود. این کانی در اثر فرایند آلتراسیون و واکنش‌های هیدروترمالی سنگ‌های ریولیتی یا سنگ‌های کوارتز و فلدسپاری به‌وجود می‌آید و در طبیعت به‌عنوان نهشته‌هایی از خاک رس با دانه‌های بسیار ریز و چگالی ۲/۵۹ gr/cm^3 یافت می‌شود. در مقیاس نانو، ساختار کلی ذرات هالوزیت به‌شکل لوله‌ای است. این لوله‌ها ممکن است دراز و نازک یا کوتاه و پهن باشند. طول لوله‌های هالوزیت از ۰/۰۲ تا ۳۰ میکرومتر متغیر است و می‌تواند به‌عنوان فیلر بین فضاهای خالی سیمان را پر کند [6, 7]. به‌علاوه، هالوزیت فراوری‌شده قدرت واکنشی بالایی دارد و کانی‌های موجود در آن می‌توانند فعالیت پوزولانی را در واکنش‌های کلینکری سیمان تا مدت زمان طولانی‌تری نسبت به میکروسیلیس، ادامه دهند. لذا در این تحقیق علاوه‌بر جایگزینی پوزولان به‌جای سیمان، کاهش حجم منافذ مویینه و حفره‌ها،

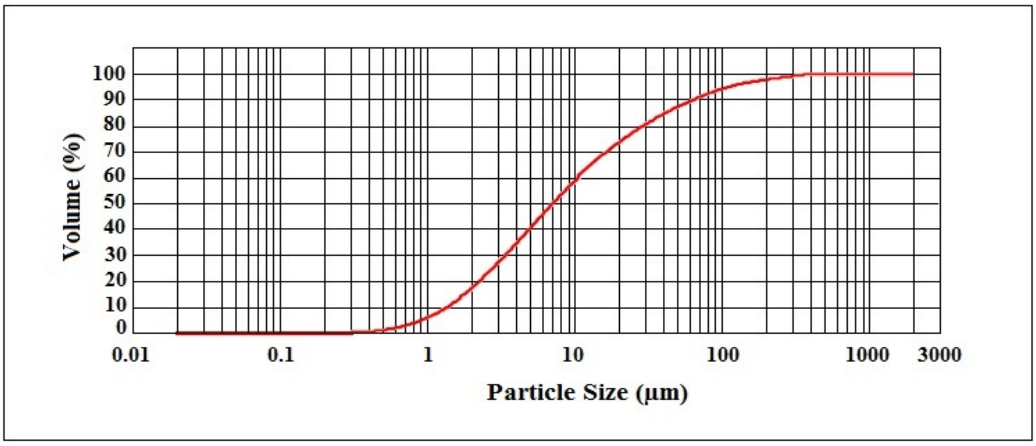
کاهش میکروترک‌ها، افزایش فرایند هیدراسیون و گسترش ژل سیلیکاتی (C-S-H) مورد هدف است. به‌دلیل تأخیر در عملکرد پوزولانی متاهالوزیت نسبت به میکروسیلیس، زمان عمل‌آوری نمونه‌ها تا سن ۹۰ روز ادامه یافت تا واکنش‌های پوزولانی تکمیل‌تر و تفاوت عملکرد متاهالوزیت و میکروسیلیس واضح‌تر گردد.

فراوری مواد و مصالح مورد استفاده

هالوزیت مورد استفاده برای این تحقیق براساس مطالعات زمین‌شناسی و فراوانی آن در طبیعت، از معادن خاک رس شهربابک کرمان تهیه شد. برای افزایش سطح ویژه و بهبود عملکرد پوزولانی آن در محیط بتن، خاک هالوزیت توسط آسیاب لس‌آنجلس دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران تا حد ممکن به پودری نرم تبدیل شد. پودر حاصل از سایش، در مرکز فراوری مواد معدنی ایران واقع در شهر کرج طبق استاندارد ASTM, C311 در کوره، تحت حرارت تدریجی (T_{max} =۷۵۰°C) به‌مدت ۳ ساعت قرار گرفت. در این فرایند، ضمن کلسینه‌شدن آهک و از دست‌دادن آب ملکولی (هیدروکسیل) و آب بین‌لایه‌ای هالوزیت و تبدیل آن به متاهالوزیت، موجبات افزایش قدرت واکنش‌پذیری، افزایش تخلخل و کوچک‌ترشدن اندازهٔ ذرات آن نیز فراهم گردید. همچنین در این فرایند با درهم شکستن شبکهٔ رس، آمادگی آرایش جدید اتم‌های Si و Al فراهم شد و با تبدیل Al^{VI} به Al^{V} و Al^{IV} موجبات قدرت واکنشی بیشتر برای متاهالوزیت فراهم گردید به‌طوری که بتواند مقادیر زیادی از پرتلندیت $[Ca(OH)_2]$ سیمان را مصرف کند [7-4].

در شکل (۱) توزیع دانه‌بندی نشان می‌دهد که حدود ۹۵ درصد حجمی اندازهٔ ذرات متاهالوزیت قطری کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرون دارند، لذا اکثریت ذرات متاهالوزیت از سیمان ریزترند. سیمان معمولی استفاده‌شده در ساخت نمونه‌های بتنی از نوع پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ با سطح ویژهٔ متوسط تولید کارخانه سیمان تهران می‌باشد. سنگدانه‌های مصرفی در این تحقیق شامل شن و ماسهٔ طبیعی شسته‌شده است که از رودخانهٔ جاجرود تهران تهیه شده‌است. میکروسیلیس استفاده‌شده محصولی از شرکت ژیکا است. میکروسیلیس و متاهالوزیت به‌صورت دوغاب و همراه با آب در ساخت بتن مورد استفاده قرار گرفتند.

آب مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها آب آشامیدنی شهر تهران است. به‌منظور کاهش مصرف آب و افزایش کارایی بتن، از محلول فوق‌روان‌کننده‌ای با نام تجاری LG Chem که برپایهٔ پلی‌کربکسیلیک اتر اصلاح‌شده قرار دارد، استفاده شد [8].



شکل ۱ توزیع اندازهٔ ذرات متاهالوزیت شهربابک کرمان (پس از سایش و فراوری حرارتی)

ترکیب شیمیایی متاهالوزیت شهربابک

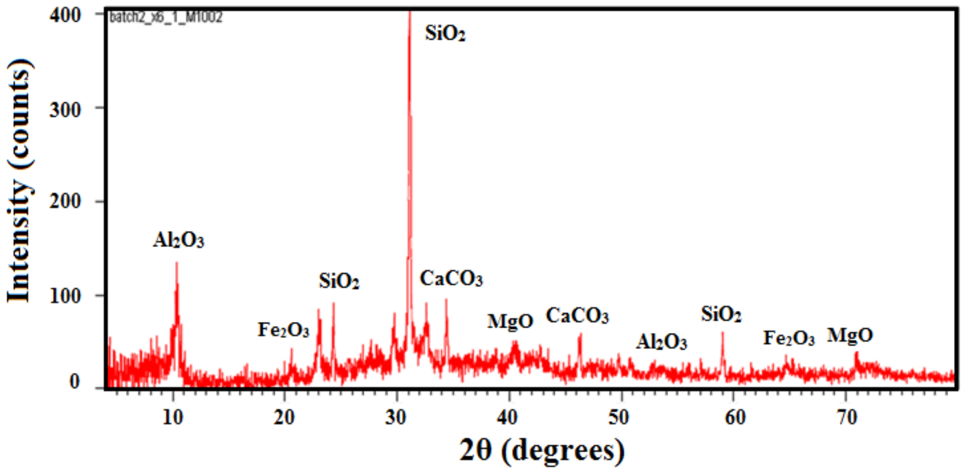
نتایج حاصل از آنالیز طیف‌سنجی فلورسانس اشعهٔ ایکس X-ray Fluorescence (XRF) برروی نمونهٔ متاهالوزیت در جدول (۱) نشان داده شده‌است. مجموع درصدهای وزنی اکسید سیلیسیم (٤٦/۲۹)، اکسید آلومینیم (۱۷/٥۱) و اکسید آهن (٦/٩٤) در این متاهالوزیت برابر با ۷۰/۷٤ است که برطبق استاندارد ,ASTM, C618-78 مادهٔ پوزولانی تعریف می‌شود. سایر خواص شیمیایی مطلوب آن عبارتند از پایین‌بودن درصد وزنی اکسید سدیم (۱/۰٤) و اکسید پتاسیم (۳/۱۷) که احتمال واکنش‌های قلیایی در بتن را کاهش می‌دهند. مقدار درصد وزنی تری اکسید گوگرد در آن پایین و برابر با ۱/۲۲ است که شاخص منشأ هیدروترمالی آن است و احتمال حملات سولفاتی را در بتن کاهش می‌دهد. درصد افت وزنی آن دراثر اعمال حرارت Loss on Ignition (LOI) برابر با ٤/۹۲ است که به حداکثر مقدار مجاز استاندارد بسیار نزدیک است (ASTM, C618-78, LOI = 5 wt%). این خاصیت مورد انتظار است زیرا سطح ویژهٔ هالوزیت بالاست و در ترکیب شیمیایی اندلایت آب بیشتری نسبت به هالوزیت وجود دارد، لذا درصد افت وزنی ناشی از اعمال حرارت در آن بیشتر است. افزایش افت حرارتی نشانهٔ این است که صفحات بیشتر کانی‌های آبدار آن درهم شکسته شده‌است و آمورف‌شدن کانی‌های آن گسترش یافته‌است و کانی‌ها در فاز انتقالی قرار گرفته‌اند که درمجموع باعث افزایش پتانسیل واکنشی آن می‌شود. ضمنا منشأ هیدروترمالی متاهالوزیت شهربابک نسبت به سایر رس‌ها که عموما منشأ رسوبی دارند، متفاوت است، بنابراین احتمال وجود ناخالصی‌های نامطلوب هیدروکربنی در آن بسیار ضعیف است.

ترکیب شیمیایی متاهالوزیت بااستفاده از آزمایش پراش اشعهٔ ایکس X-ray diffraction (XRD) تهیه شد که در شکل (۲) نشان داده شده‌است. کوارتز، کلسیت، ایلیت و مسکویت به‌ترتیب فراوان‌ترین کانی‌های موجود در این پوزولان هستند. براساس آزمایش‌های XRD (شکل ۱) و XRF (جدول ۱) وجود کانی کلسیت و درصد وزنی بالای اکسید کلسیم (۱۱/۲۷)، نشانهٔ حضور کربنات آزاد در این پوزولان است که منجر به تشکیل و تبلور کربوآلومینات می‌گردد و باعث افزایش مقاومت ژل سیمان می‌شود [6, 7].

جدول ۱ ترکیب شیمیایی (XRF) متاهالوزیت

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی
SiO_2	٤٦/۲۹
Al_2O_3	۱۷/٥۱
Fe_2O_3	٦/٩٤
MgO	٥/٦۷
CaO	۱۱/۲۷
K_2O	۳/۱۷
Na_2O	۱/۰٤
P_2O_5	۰/۳۰
TiO_2	۰/۹۷
SO_3	۱/۲۲
SrO	۰/۰۷
Cl	۰/٦۲
Loss On Ignition (LOI)	٤/۹۲
Total	۹۹/۹۹

باتوجه به این‌که طی فرایند کلسینه‌شدن هالوزیت، پس از خروج آب تبلور از آن، شبکهٔ اکتاهدرال آلومینیم در هم می‌شکند و دراثر اکسیدشدن، Fe^{2+} به Fe^{3+} تبدیل می‌شود و آهن سه‌ظرفیتی (Fe^{3+}) در محیط سیمان جایگزین Al^{3+} می‌گردد، حضور کانی‌های ایلیت و مسکویت که دارای مقادیر زیادی Al هستند، بیشترین مشارکت را در فعال‌سازی واکنشی متاهالوزیت برعهده دارند [6, 9, 10].



شکل ۲ آنالیز XRD برروی متاهالوزیت شهربابک (پس‌از انجام عملیات فراوری)

جدول ۲ مشخصات طرح‌های اختلاط

شمارهٔ طرح	نمایش طرح	W/C	جایگزینی متاهالوزیت (٪)	جایگزینی میکروسیلیس (٪)	اجزای سازندهٔ بتن در یک مترمکعب (kg/m^3)					
					OPC	متاهالوزیت	میکروسیلیس	آب	ریزدانه	درشت دانه
MIX1	H0SF0	۰/۴۰	–	–	۴۰۰	–	–	۱۶۰	۱۲۸۸	۵۵۲
MIX2	H0SF7	۰/۴۰	–	۷	۳۷۲	–	۲۸	۱۶۰	۱۲۸۸	۵۵۲
MIX3	H10SF7	۰/۴۰	۱۰	۷	۳۳۲	۴۰	۲۸	۱۶۰	۱۲۸۸	۵۵۲
MIX4	H20SF7	۰/۴۰	۲۰	۷	۲۹۲	۸۰	۲۸	۱۶۰	۱۲۸۸	۵۵۲
MIX5	H0SF0	۰/۴۵	–	–	۴۰۰	–	–	۱۸۰	۱۲۷۴	۵۴۶
MIX6	H0SF7	۰/۴۵	–	۷	۳۷۲	–	۲۸	۱۸۰	۱۲۷۴	۵۴۶
MIX7	H10SF7	۰/۴۵	۱۰	۷	۳۳۲	۴۰	۲۸	۱۸۰	۱۲۷۴	۵۴۶
MIX8	H20SF7	۰/۴۵	۲۰	۷	۲۹۲	۸۰	۲۸	۱۸۰	۱۲۷۴	۵۴۶
H = halloysite; SF = micro silica; OPC = ordinary Portland cement; W/C = water to cementitious materials.										

مشخصات طرح‌های اختلاط

در این تحقیق ۸ طرح اختلاط با دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ و ۰/۴۵ ساخته شده‌است (جدول ۲). میکروسیلیس به‌میزان ۷ درصد و متاهالوزیت به‌میزان ۱۰ و ۲۰ درصد مشارکت، جایگزین سیمان پرتلند شده‌اند. در کلیهٔ طرح‌ها عیار سیمان kg/m^3 ۴۰۰ درنظر گرفته شد. برای کنترل کارایی بتن و رسیدن به اسلامپ مطلوب (۸۰ الی ۱۲۰ میلی‌متر)، از فوق‌روان‌کنندهٔ LG Chem Supperplasticizer استفاده شد. دلیل دیگر استفاده از فوق‌روان‌کننده این است که در بتن‌های ساخته شده با پوزولان، فوق‌روان‌کننده با جذب سطحی و قرارگرفتن در سطح ذرات سیمان باعث تأخیر در فرایندهای آبگیری C_3S و C_3A در سیمان می‌شود و کسب مقاومت اولیه را به تأخیر می اندازد تا پوزولان فرصت ورود به واکنش را پیدا کند [8, 11].

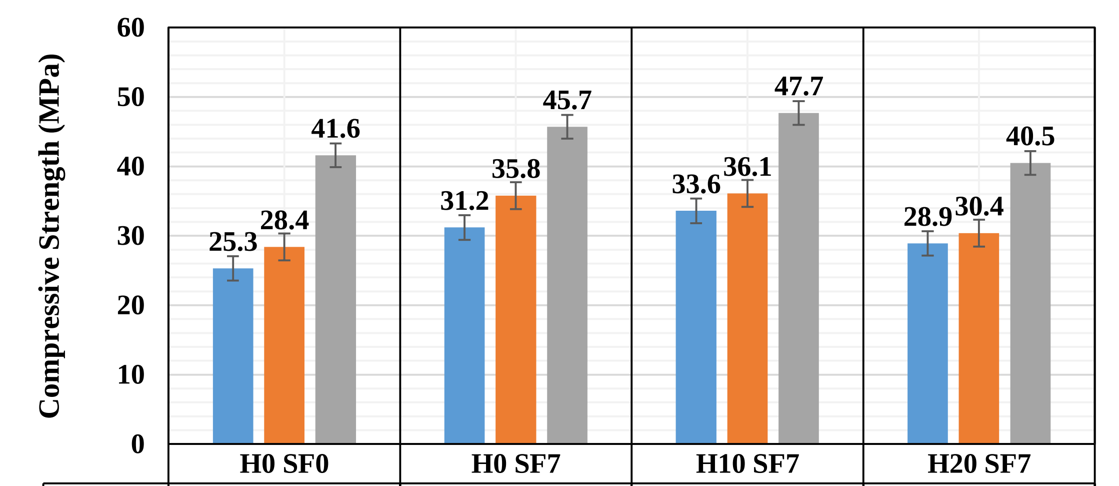
مراحل ساخت و نگهداری نمونه‌ها

در این تحقیق از قالب‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ cm برای

ساخت نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش التراسونیک استفاده شد و از قالب‌های منشوری به‌ابعاد ۱۰×۱۰×۴۰ سانتی‌متر برای تعیین مدول گسیختگی به‌کار رفت. برای کسب اطمینان از صحت نتایج آزمایش‌های انجام‌شده و کاهش خطا، برای هر طرح اختلاط و برای هر سن، سه نمونهٔ بتنی ساخته شد و میانگین اعداد در محاسبات و ترسیم شکل‌ها به‌کار رفته‌است. همهٔ نمونه‌های بتن تازه تا سن آزمایش (۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز) درون حوضچهٔ آب با دمای ثابت (۲۲ درجهٔ سانتی‌گراد) نگه‌داری شدند.

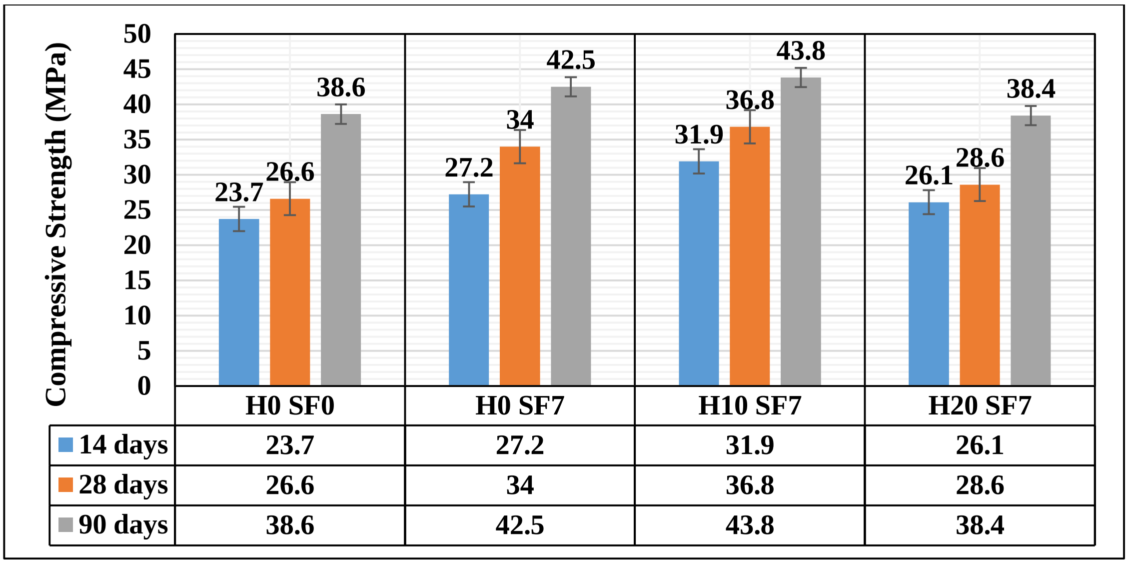
مقاومت مکانیکی بتن سخت‌شده

نتایج آزمایش‌های مکانیکی برروی بتن‌های سخت‌شده نشان می‌دهد که روند جایگزینی سیمان توسط میکروسیلیس و متاهالوزیت در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی در همهٔ مخلوط‌ها با افزایش سن بتن به‌صورت نرمال و در روند افزایش مقاومت فشاری ادامه داشته‌است (شکل‌های ۴-۳). مقایسهٔ شکل‌های (۳) و (۴) نشان می‌دهد که در نسبت آب به مواد سیمانی کمتر (۰/۴۰)، واکنش‌های پوزولانی کامل‌تر انجام شده‌اند. به‌عنوان مثال در شکل (۳) طرح اختلاط H10SF7 از سن ۱۴ روزه تا سن ۹۰ روزه نسبت به نمونهٔ شاهد بیشترین درصد افزایش مقاومت فشاری (۰/۸۹) را از ۲۵/۳ تا ۴۷/۷ مگاپاسکال نشان می‌دهد. علت کسب مقاومت بیشتر در نسبت آب به مواد سیمانی کمتر، سطح ویژهٔ بالای مواد پوزولانی استفاده شده‌است. از طرفی دیگر، متاهالوزیت در ادامهٔ واکنش‌های پوزولانی و درازمدت، نقش واکنشی کامل‌تری نسبت به میکروسیلیس داشته‌است. نظر به این‌که با افزایش مشارکت درصد متاهالوزیت (طرح اختلاط H20SF7) تقریبا روند کاهش مقاومت فشاری آغاز شده‌است (شکل ۳)، می‌توان استنتاج کرد که درصد مشارکت بهینه و توأم این دو پوزولان به‌ترتیب برای میکروسیلیس و متاهالوزیت ۷ و ۱۰ درصد است و افزایش درصد بیشتر متاهالوزیت نقش پرکنندگی (فیلر) داشته‌است.



	H0 SF0	H0 SF7	H10 SF7	H20 SF7
14 days	25.3	31.2	33.6	28.9
28 days	28.4	35.8	36.1	30.4
90 days	41.6	45.7	47.7	40.5

شکل ۳ مقاومت فشاری بتن سخت‌شده در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ برای تمام سنین



	H0 SF0	H0 SF7	H10 SF7	H20 SF7
14 days	23.7	27.2	31.9	26.1
28 days	26.6	34	36.8	28.6
90 days	38.6	42.5	43.8	38.4

شکل ٤ مقاومت فشاری کسب‌شده برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/٤۵ برای تمام سنین

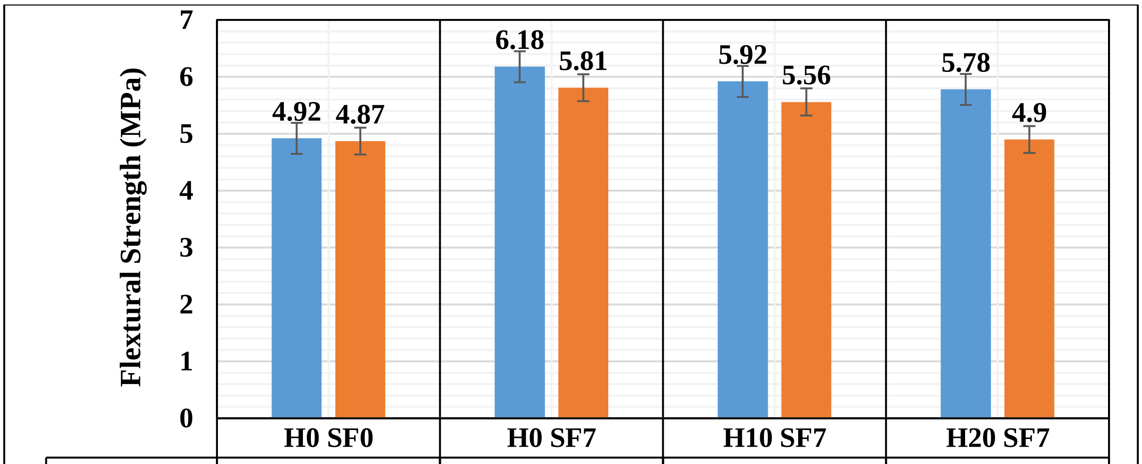
مقایسهٔ طرح‌های اختلاط مخصوصا H10SF7 و H0SF7 در شکل (۳) نشان می‌دهد که در فاصلهٔ زمانی ١٤ تا ۲۸ روز روند افزایش مقاومت ناچیز است (حدود ۳ مگاپاسکال)، بنابراین میکروسیلیس بیشتر نقش تأمین مقاومت اولیه را ایفا کرده‌است. اما در سن ۹۰ روز مقاومت فشاری همهٔ طرح‌ها به‌شدت افزایش یافته‌است. این افزایش به‌دلیل افزایش سن بتن و نیز تفاوت عملکردی دو نوع پوزولان است. به‌عبارت دیگر، میکروسیلیس حداکثر فعالیت واکنشی خود را تا سن ۲۸ روز انجام داده‌است. سپس در ادامهٔ واکنش‌های آبگیری سیمان (هیدراسیون)، پرتلندیت تولیدشده را متاهالوزیت در واکنش پوزولانی خود مصرف کرده‌است و باعث بهبود ریزساختار ناحیهٔ انتقال بین سنگدانه و خمیر سیمان شده‌است که افزایش مقاومت نهایی بتن را ایجاد می‌کند. بنابراین، استفادهٔ توأم از پوزولان‌های میکروسیلیس و متاهالوزیت علاوه‌بر نقش پرکنندگی فضاهای خالی، خاصیت پخش‌کنندگی (توزیع یکنواخت) مواد سیمانی و کاهش مصرف آب در بتن را انجام می‌دهند. مخصوصا، در این تحقیق متاهالوزیت نشان می‌دهد که ادامهٔ واکنش‌های پوزولانی را پس از پوزولان صنعتی (میکروسیلیس) تا رسیدن به مقاومت نهایی بتن کامل‌تر برعهده دارد. علاوه‌بر مزیت‌های فوق‌الذکر، جایگزینی درصدهایی از مواد پوزولانی صنعتی و طبیعی به‌جای سیمان پرتلند موجب کاهش مصرف سیمان و کمک به حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی است.

مقاومت خمشی بتن سخت‌شده

مدول گسیختگی (modulus of rupture)، براساس مقاومت خمشی تیرهای بتنی بدون آرماتور دراثر خمش، و اعمال بار سه‌نقطه‌ای تعیین می‌شود. در این تحقیق آزمایش مدول گسیختگی در سن ۲۸ روز با رعایت استاندارد ASTM C78-02 برروی نمونه‌های منشوری انجام شد و نتایج حاصل در شکل (۵) نشان داده شده‌است.

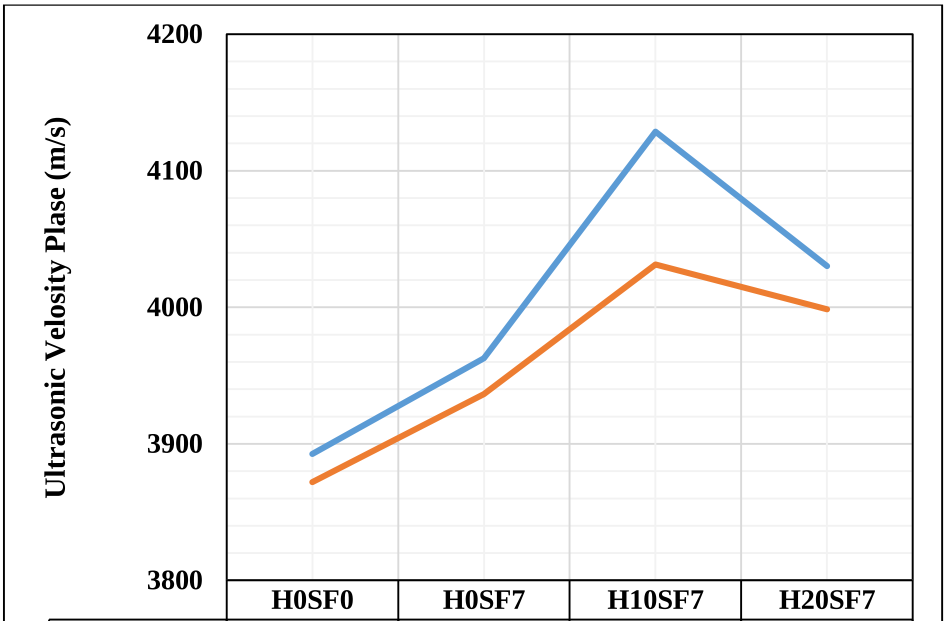
شکل (۵) نشان می‌دهد که مقاومت خمشی تمام طرح‌های حاوی متاهالوزیت و میکروسیلیس از مقاومت

خمشی نمونه‌های شاهد بیشتر شده‌است. اختلاف کمترین مقاومت خمشی (نمونهٔ شاهد ٤/٨٧ مگاپاسکال) و بیشترین مقدار آن برابر با ٦/١٨ مگاپاسکال در نمونه‌های با کمترین نسبت آب به مواد سیمانی دیده می‌شود. بنابراین افزایش مقاومت خمشی درنتیجهٔ عملکرد مواد پوزولانی و کاهش فضاهای خالی است. اگرچه به‌طور کلی اختلاف بسیار ناچیزی (١/٣١ مگاپاسکال) در کمترین نسبت آب به مواد سیمانی یا در سنین متفاوت نمونه‌های بتنی ملاحظه می‌شود، ولی در هردو نسبت آب به مواد سیمانی بیشترین مقاومت خمشی در طرح‌های حاوی ۷ درصد میکروسیلیس حاصل شده‌است. باتوجه به نزدیک‌بودن مقادیر مقاومت خمشی در همهٔ طرح‌ها می‌توان نتیجه گرفت که محصولات نهایی میکروسیلیس و متاهالوزیت علاوه‌بر نقش پرکنندگی دارای مدول الاستیسیتهٔ بیشتری نسبت به سیمان هستند. مقاومت فشاری زیادی که توسط متاهالوزیت تولید شده‌است نشانهٔ قدرت چسبندگی ژل سیلیکاتی C-S-H و کاهش تخلخل نمونه‌ها ناشی از کم‌شدن مصرف آب و نقش پرکنندگی این پوزولان است که اهمیت کاربردی آن را بیشتر می کند. ضمنا ساختمان کانی متاهالوزیت به‌صورت کریستال‌های لوله‌ای و الیاف‌مانند است که این خاصیت می‌تواند تاحدودی سبب بهبود مقاومت خمشی بتن شود. مقایسهٔ طرح‌های حاوی ۱۰درصد متاهالوزیت با طرح‌های حاوی ۲۰ درصد متاهالوزیت نشان می‌دهد که افزایش سطح جایگزینی متاهالوزیت از ۱۰ درصد به ۲۰ درصد، سبب کاهش مقاومت خمشی شده‌است. چنان‌چه افزایش سطح جایگزینی متاهالوزیت بیشتر نقش پرکنندگی داشته باشد به‌طوری‌که استحکام ناشی از واکنش‌های پوزولانی را تحت تأثیر قرار دهد، این سناریو تأیید می‌کند که مقدار بهینهٔ مصرف این دو پوزولان در مخلوط‌های بتنی به‌ترتیب ۷ و ۱۰ درصد برای میکروسیلیس و متاهالوزیت است.



	H0 SF0	H0 SF7	H10 SF7	H20 SF7
W/C = 0.40	4.92	6.18	5.92	5.78
W/C = 0.45	4.87	5.81	5.56	4.9

شکل ۵ مقاومت خمشی ۲۸ روزه برحسب مگاپاسکال



	H0SF0	H0SF7	H10SF7	H20SF7
w/c=0.4	3893	3963	4129	4030
w/c=0.45	3872	3937	4031	3999

شکل ٦ سرعت امواج التراسونیک برحسب متر بر ثانیه برای سن ۲۸ روز

دوام بتن‌های سخت‌شده

نتایج آزمایش التراسونیک برروی نمونه‌های مکعبی با سطح مقطع ۱۰۰ سانتی‌متر مربع در سن ۲۸ روز برای هر دو نسبت آب به مواد سیمانی در شکل (٦) نشان داده شده‌است. این آزمایش به‌منظور تعیین میزان همگنی بتن، وجود حفرات، میکرودرزه‌ها و ترک‌ها، تغییر خصوصیات بتن نسبت به زمان (پیشرفت واکنش پوزولانی)، تراکم سنگدانه‌ها و اتصال آنها به یکدیگر، کیفیت سنگدانه و دانه‌بندی بهینه و یا تغییرات حاصل از اثرات محیطی و دمایی (مانند آتش‌سوزی و یخبندان)، حملات شیمیایی و خوردگی بتن می‌باشد. هرچه سرعت امواج التراسونیک بالاتر باشد، میزان حفرات و منافذ بتن کمتر است، و کیفیت بتن سخت‌شده بیشتر است؛ لذا امواج التراسونیک در زمان کوتاه‌تری طول نمونه را طی می کنند. در این‌صورت نمونهٔ بتنی دارای خواص مکانیکی بالا و دوام زیاد است، به‌عبارتی در شرایط محیطی پایدارتر است [7-9].

شکل (٦) نشان می‌دهد که در تمام طرح‌های اختلاط نسبت به نمونهٔ شاهد، با افزایش سن بتن سرعت امواج التراسونیک افزایش یافته‌است. همچنین در تمام طرح‌های ساخته‌شده با میزان آب کمتر (۰/٤۰) نسبت به طرح‌های ساخته‌شده با آب زیاد (۰/٤٥) سرعت امواج بیشتر شده‌است. بنابراین، واکنش‌های پوزولانی و قدرت پخش‌کنندگی زیاد ذرات پوزولان ضمن بهینه‌سازی مصرف آب باعث کاهش تخلخل و افزایش تراکم بیشتر در نمونه‌های بتنی شده‌است [6, 7].

بیشترین سرعت عبوری امواج مربوط به طرح حاوی ۷ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد متاهالوزیت است. این خاصیت در تطابق با بیشترین رکورد مقاومت‌های فشاری و خمشی است که در این طرح ثبت گردیده‌است (شکل‌های ۵-۳). شکل (٦) نشان می‌دهد که در طرح H20SF7 نسبت به طرح H10SF7 سرعت امواج کاهش یافته‌است. علت این موضوع جایگزینی درصد بالای پوزولان متاهالوزیت و عدم فرصت کافی در

سن ۲۸ روز برای سرعت گرفتن تکمیل واکنش‌های پوزولانی آن است؛ بنابراین، واکنش‌های پوزولان طبیعی (متاهالوزیت) نسبت‌به پوزولان صنعتی (میکروسیلیس) تأخیر فاز دارد و در زمان طولانی‌تری پرتلندیت حاصل از هیدراسیون سیمان را مصرف می‌کند و لزوم توأم شدن دو پوزولان را فراهم می‌سازد.

نتیجه‌گیری

براساس اطلاعات به‌دست‌آمده از این تحقیق نتایج زیر ارائه می‌گردد:

۱. پوزولان طبیعی متاهالوزیت در سنین بالا (۹۰ روز) عملکرد قوی‌تری در بهبود مقاومت نهایی بتن نسبت به پوزولان صنعتی میکروسیلیس دارد.

۲. متاهالوزیت و میکروسیلیس به‌ترتیب با جایگزینی بهینهٔ ۱۰ و ۷ درصد وزنی به‌جای سیمان پرتلند، مقاومت نهایی بتن را تا ۸۹ درصد افزایش می‌دهند.

۳. با افزایش درصد جایگزینی متاهالوزیت (از ۱۰٪ به ۲۰٪) نقش پرکنندگی آن گسترش می‌یابد و تأثیرات واکنش‌های پوزولانی آن کم می‌شود.

٤. مشارکت متاهالوزیت و میکروسیلیس در کمترین نسبت آب به سیمان (٤۰٪) باعث افزایش مقاومت مکانیکی و دوام بتن می‌شود.

۵. متاهالوزیت واکنش‌های پوزولانی خود را پس از میکروسیلیس (بعد از سن ۲۸ روز) گسترش می‌دهد. بنابراین، افزایش تراکم، دوام و کیفیت مورد انتظار از عملکرد متاهالوزیت، در زمان طولانی فراهم می‌شود و میکروسیلیس بیشتر مقاومت اولیهٔ بتن را تأمین می‌کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله با نهایت افتخار مراتب تشکر و سپاس خود را از دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران به‌خاطر قراردادن امکانات کارگاهی و آزمایشگاهی ابراز می نمایند.

مراجع

1. Roger, S.A., Leng, V., Salvador, D., Antoni, M., Adrian, A. and Fernando M., "Industrial Calcination of Kaolinitic Clays to Make Reactive Pozzolans", *Journal of the Case Studies in Construction Materials*, Vol. 6, pp. 225-232, (2017).

2. Gartner, E., "Industrially Interesting Approaches to Low-CO_2 Cements", *Journal of the Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1489-1498, (2004).

3. Vikas, S., Rakesh, K., Agarwal, V.C. and Mehta P.K., “Effect of Silica Fume and Metakaolin Combination on Concrete”, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 893-900, (2012).

4. Zapala-Slaweta, J., “The Effect of Meta-Halloysite on Alkali–Aggregate Reaction in Concrete”, *Journal of Materials and Structures*, Vol. 50, pp. 50:217, (2017)., doi: 10.1617/s11527-017-1084-9

5. Susan, A., Bernal, M.C.G., Juenger, X.K., Winnie, M., Barbara, L., Nele, D.B. and John, L.P., “Characterization of Supplementary Cementitious Materials by Thermal Analysis”, *Journal of Materials and Structures*, 50:26, (2017).

6. Blanca, B.L., “Halloysite and Kaolinite: Two Clay Minerals with Geological and Technological

Importance”, *Rev. Real Academia de Ciencias, Zaragoza*, Vol. 70, pp. 7–38, (2015).

7. Sabir, B.B., Wild, S. and Bai, J., “Matakaolin and Calcined Clays as Pozzolans for Concrete: A Review”, *Journal of Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, pp. 441-454, (2001).
8. Mazloom, M., Ramezanianpour, A.A. and Brooks, J.J., "Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-Strength Concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 347-357, (2004).
9. Bahia, R., Khaled, B. and Youcef, G., "Study of Calcined Halloysite Clay as Pozzolanic Material and Its Potential Use in Mortars", *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 31, No. (7), pp. 5179-5192, (2012).
10. Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Richi, D. and Delvaux, B.,"Halloysite Clay Minerals a Review", *Clay Minerals*, Vol. 40, pp. 383-426, (2005).
11. Alejandra, T., Fernanda, C., Alberto, N.S. and Edgardo, F.I., “Hydration of Blended Cement with Halloysite Calcined Clay”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*, Vol. 16, pp 455-460, Dordrecht: Springer, (2018).

Standards:

ASTM: C311–05, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete.

ASTM: C78-02, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple - Beam with Third –Point Loading).

ASTM: C618–78, Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.